

р. 6.7

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED  
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

Серия А

№ 174

1960

---

Г. К. САМОЛЕВСКИЙ

**НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ  
В ЦЕПЯХ ЭЛЕКТРОМАШИНОГО  
УСИЛИТЕЛЯ ПРОДОЛЬНОГО ПОЛЯ**

ТАЛЛИН, 1960





Ep. 6.7

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED  
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

Серия А

№ 174

1960

---

Г. К. САМОЛЕВСКИЙ

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ  
В ЦЕПЯХ ЭЛЕКТРОМАШИННОГО  
УСИЛИТЕЛЯ ПРОДОЛЬНОГО ПОЛЯ

ТАЛЛИН, 1960

1960 № 174 Серија А

Л. С. САМОИЛОВИЧ

ВНЕШНИЕ ЭЛЕМЕНТЫ  
В ПЕРИОД ПЕРИОДИЧЕСКОГО  
ПРОДОЛЖЕНИЯ

Ep. 3374



1960, 174, А



## 1. ПОСТАНОВКА ВОПРОСА

В современных схемах автоматического регулирования находят практическое применение двух- и трехступенчатые электромашинные усилители продольного поля (рототролы).

Исследованию установившихся и переходных процессов усилителей продольного поля посвящены труды ряда авторов (А. Е. Алексеева, В. Ф. Байко, А. А. Вавилова, Ф. А. Горяинова, Б. Я. Гусева, В. Е. Малишевского, Б. И. Норневского, Б. Ф. Токарева, Б. Литмана, М. Лившица, Ф. Чаппу и др.).

В опубликованных трудах в основу анализа работы ЭМУ продольного поля положены следующие основные допущения:

- а) магнитная система усилителя ненасыщена;
- б) остаточное намагничивание не учитывается;
- в) предполагается прямолинейная коммутация;
- г) не учитывается температурное воздействие на цепи усилителя.

Известно, что в случае использования усилителя в качестве автоматического регулятора его нормальная работа, с точки зрения обеспечения требуемой точности регулирования, возможна лишь в ненасыщенном состоянии. Далее, в современных конструкциях усилителей с использованием специальных сталей может быть достигнута сравнительно узкая петля гистерезиса. Ввиду указанных обстоятельств в анализе работы усилителя первые два допущения имеют достаточную обоснованность.

Однако температурное воздействие на цепи усилителя имеет место во всех случаях работы ЭМУ. С последним обстоятельством связано изменение сопротивлений обмоток усилителя и изменение условий коммутации.

В связи с вышеизложенным имеет существенное значение исследование влияния нелинейных элементов в цепях ЭМУ продольного поля при температурных изменениях.

Для исследования принимается трехступенчатый ЭМУ продольного поля с последовательной обмоткой самовозбуждения.

Подобный усилитель находит применение в схемах автоматического регулирования, в которых настройка усилителя в процессе работы не должна изменяться. К подобным схемам относятся схемы возбуждения синхронных генераторов, индивидуальные схемы регулирования мощности и др.

В таких схемах на ЭМУ возлагается задача обеспечения постоянства тока нагрузки при неизменном значении м. д. с. управления. В связи с температурным изменением параметров усилителя и нагрузки условие постоянства нагрузочного тока может быть соблюдено лишь с определенной степенью точности.

В данной работе проводится исследование влияния температурного изменения параметров усилителя и нагрузки на режим работы ЭМУ;

- а) при неизменной величине м. д. с. управления,
- б) при изменяющейся величине м. д. с. управления, причем ставится задача рассмотрения качественной стороны температурного переходного процесса с учетом нелинейностей элементов в цепях ЭМУ.

## **2. ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС ЭМУ ПРИ НЕИЗМЕННОЙ ВЕЛИЧИНЕ М. Д. С. УПРАВЛЕНИЯ В ПРЕДПОЛОЖЕНИИ ПРЯМОЛИНЕЙНОЙ КОММУТАЦИИ**

Рассмотрим температурный переходный процесс ЭМУ в случае, когда коммутация прямолинейна во всех трех ступенях усилителя, независимо от температурного состояния ЭМУ.

Полная схема трехступенчатого ЭМУ продольного поля с последовательной обмоткой самовозбуждения представлена на рисунке 1.

Здесь введены следующие условные обозначения:

- У — обмотка управления,
- В — обмотка возбуждения,
- СВ — обмотка последовательного самовозбуждения,
- К — компенсационная обмотка,
- Д — обмотка добавочных полюсов.



Для выявления зависимости напряжения  $U_3$  (либо тока  $I_3$ ) на выходе усилителя от температурного изменения его параметров, при неизменной м. д. с. управления, составим следующую систему исходных уравнений:

$$E_{13} = \frac{c}{a'} \left[ 2 \omega_y I_y + 2 (\omega_k - \omega_a) I_{24} \right] \quad (1)$$

$$E_{24} = \frac{c}{a'} 2 \omega_a I_{13} \quad (2)$$

$$E_3 = \frac{c}{a'} (2 \omega_b I_{24} + 2 \omega_{cb} I_3) \quad (3)$$

Здесь:

$E_{13}$ ,  $E_{24}$  и  $E_3$  — э. д. с. первой, второй и третьей ступени.  $c$  и  $a'$  — коэффициенты пропорциональности между э. д. с. и потоком, между м. д. с. и потоком — определяемые по кривой намагничивания и холостого хода усилителя. В ненасыщенном состоянии коэффициент  $c$  имеет одинаковое значение для всех каскадов усилителя; то же относится соответственно к коэффициенту  $a'$ .

$\omega_y, \omega_k, \omega_a, \omega_b, \omega_{cb}$  — количество витков на полюс обмотки управления, компенсационной, якоря, возбуждения и самовозбуждения.

$I_y, I_{13}, I_{24}, I_3$  — ток в обмотке управления, в цепях щеток 1—3 и 2—4, ток выходной ступени усилителя.

Решение системы уравнений (1) . . . (3) дает следующую зависимость тока  $I_3$  от параметров усилителя, при  $AW_y = I_y \cdot \omega_y = const$ :

$$I_3 = \frac{\left( 2 \frac{c}{a'} \right)^3 \cdot \omega_a \cdot \omega_b}{\left( r_3 - 2 \frac{c}{a'} \omega_{cb} \right) \left[ r_{13} \cdot r_{24} - \left( 2 \frac{c}{a'} \omega_a \right)^2 \cdot \varepsilon \right]} AW_y \quad (4)$$

Здесь  $\varepsilon = \frac{2 (\omega_k - \omega_a)}{2 \omega_a}$  — степень недокомпенсации продольной реакции якоря,

$r_{13}, r_{24}$  и  $r_3$  — сопротивления цепи щеток 1—3, 2—4 и выходного каскада.

В процессе температурного воздействия могут изменяться сопротивления  $r_{13}, r_{24}$  и  $r_3$ .

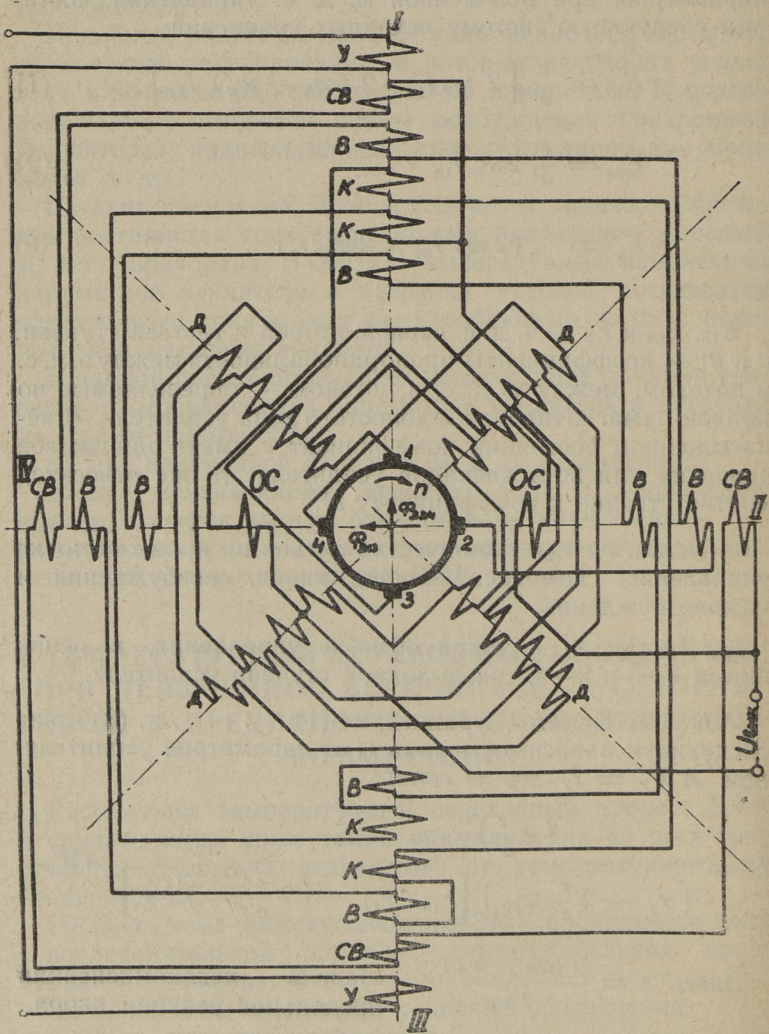


Рис. 1.



Сопротивления  $r_{13}$  и  $r_{24}$  выражаются через их составляющие следующим образом:

$$r_{13} = r'_a + r_{щ}, \quad (5)$$

$$r_{24} = r''_a + r_{щ}, \quad (6)$$

где  $r'_a$  и  $r''_a$  — сопротивления якорной цепи 1 и 2 ступени для уравнительного тока, за исключением сопротивления переходного контакта щеток;

$r_{щ}$  — переходное сопротивление щеточного контакта.

Рассмотрим, для упрощения, элементы  $r'_a$  и  $r''_a$  в качестве однородных, температура различных точек которых в каждый из моментов времени имеет одинаковое значение. При таких условиях нагрев элементов  $r'_a$  и  $r''_a$  в функции времени будет происходить по экспоненциальной зависимости:

$$\tau' = \tau_y \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_n}} \right) + \tau_o e^{-\frac{t}{T_n}} \quad (7)$$

Соответственно, охлаждение будет описываться зависимостью:

$$\tau'' = \tau_o \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_o}} \right) + \tau_y e^{-\frac{t}{T_o}} \quad (8)$$

Здесь:

$\tau'$  и  $\tau''$  — перегрев элемента по сравнению с окружающей средой в °С.

$\tau_y = \frac{Q}{A}$  — установившаяся температура.

$Q$  — количество тепла, выделяемое в элементе в единицу времени.

$A$  — количество тепла, отдаваемого в окружающую среду элементом в единицу времени, при разности температур цепи и окружающей среды в 1°С.

$T_n = \frac{C_1}{A}$  — постоянная времени нагрева.

$C_1$  — теплоемкость элемента.

$t$  — время.

$\tau_o$  — начальное значение температуры.

$T_o$  — постоянная времени охлаждения.

Сопrotивление элементов  $r'_a$  и  $r''_a$  слагается из сопро-  
тивления медных проводников цепей 1—3 и 2—4.

Зависимость сопротивления  $r'_a$  и  $r''_a$  от температуры  
нагрева выражается следующим образом:

$$r'_a = r'_{ao} [1 + \alpha(\tau - \tau_o) + \beta(\tau - \tau_o)^2 + \gamma(\tau - \tau_o)^3 + \dots] \quad (9)$$

$$r''_a = r''_{ao} [1 + \alpha(\tau - \tau_o) + \beta(\tau - \tau_o)^2 + \gamma(\tau - \tau_o)^3 + \dots] \quad (10)$$

Здесь  $r'_{ao}$  и  $r''_{ao}$  — значение сопротивлений при тем-  
пературе  $T_o$ .

Для практических расчетов достаточно учесть темпера-  
турный коэффициент  $\alpha$ ; тогда выражения (9) и (10) упро-  
щаются к линейному виду:

$$r'_a = r'_{ao} [1 + \alpha(\tau - \tau_o)] \quad (11)$$

$$r''_a = r''_{ao} [1 + \alpha(\tau - \tau_o)] \quad (12)$$

Температурный коэффициент  $\alpha$  зависит от выбора зна-  
чения начальной температуры нагрева, однако в пределах  
температуры нагрева ЭМУ продольного поля можно при-  
нять

$$\alpha = const = 0,004 \frac{1}{^\circ C}$$

Таким образом зависимости  $r'_a = f'(\tau)$  и  $r''_a = f''(\tau)$   
изображаются прямыми.

Переходное сопротивление щеточного контакта зависит  
от многих факторов, основные из которых следующие:

1. Материал щеток и коллектора.
2. Температура контактной поверхности.
3. Плотность тока переходного контакта щеток.
4. Давление на щетки.
5. Окружная скорость коллектора.
6. Химическое состояние переходного контакта.
7. Направление тока.

Точный учет влияния всех факторов ввиду их взаимо-  
зависимости, невозможен. Поэтому зависимость переход-  
ного сопротивления контакта щеток от температуры  
 $r_{щ} = f(\tau)$  необходимо проанализировать при посто-  
янстве прочих факторов.

Переходное сопротивление контакта щеток  $r_{щ} = f(\tau)$   
имеет нелинейный характер. Оно падает с возрастанием



температуры, так как переходный слой состоит из веществ с отрицательным температурным коэффициентом.

При нормальных условиях средняя величина сопротивления переходного щеточного контакта составляет 0,1 ом (угольные щетки, при 1,0 в и 10 а/ см<sup>2</sup>).

При сравнении численных значений сопротивлений  $r'_a$ ,  $r''_a$  и  $r_{щ}$  следует, что  $r'_a \gg r_{щ}$  и  $r''_a \gg r_{щ}$ .

Таким образом нелинейный характер температурного изменения переходного сопротивления щеточного контакта не имеет существенного значения при изменении суммарной величины сопротивления  $r_{13}$  (либо  $r_{24}$ ), в связи с чем можно изменением  $r_{щ}$  пренебречь и в расчете оперировать средней величиной  $r_{щ}$ .

На основании изложенных предпосылок возможно графоаналитическим путем определить переходный процесс температурного изменения сопротивлений цепей  $r_{13}$  и  $r_{24}$ . Для случая нагрева графоаналитический способ представлен на рис. 2. Кривые  $\tau = f(t)$ ,  $r_{13} = f(\tau)$  и  $r_{24} = f(\tau)$  рассчитываются и строятся согласно выражениям (7), (11), (12), (5) и (6). Порядок построения кривой  $r_{24} = f(t)$  указан

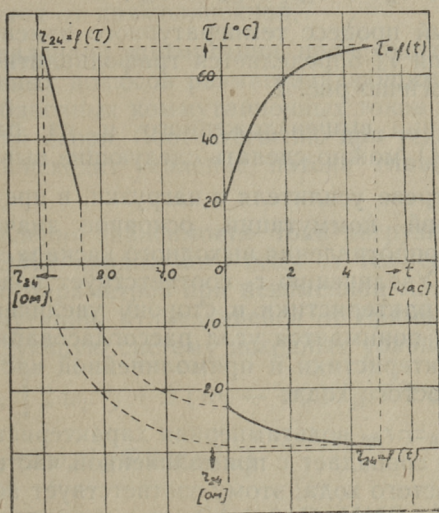


Рис. 2.

на рисунке пунктиром. Кривая  $r_{24}=f(t)$  построена по параметрам опытного образца усилителя (мощностью 0,6 квт).

Аналогично проводится графическое построение и для процесса охлаждения.

Рассмотрим далее переходный процесс температурного изменения сопротивления  $r_3$ .

Сопротивление  $r_3$  выражается через составляющие следующим образом:

$$r_3 = r_a''' + r_{cb} + r_n + r_{щ} \quad (13)$$

Здесь:

$r_a'''$  — эквивалентное сопротивление якорной цепи третьего каскада, за исключением сопротивления обмотки самовозбуждения  $r_{cb}$  и сопротивления переходного щеточного контакта  $r_{щ}$ .

$r_n$  — сопротивление нагрузки.

Температурное изменение сопротивлений  $r_a'''$ ,  $r_{cb}$  и  $r_n$  происходит по закономерности, выраженной в (11) и (12). Нелинейный характер изменения  $r_{щ}$  можно не учитывать, так как  $r_a''' + r_{cb} + r_n \gg r_{щ}$ .

Переходный процесс температурного изменения сопротивления цепи  $r_3$  определяется графоаналитическим способом, аналогично рис. 2.

На основании вышеизложенного и из рассмотрения уравнения (4) можно сделать следующие выводы:

1) при нагреве усилителя и нагрузки, в предположении прямолинейной коммутации, основное значение имеет увеличение сопротивления выходного каскада  $r_3 = r_a''' + r_{cb} + r_n$ . Увеличению  $r_3$  соответствует поворот вольт-амперной характеристики в сторону увеличения угла  $\delta$ . Под углом  $\delta$  понимается угол рассогласования вольт-амперной характеристики и прямолинейной части характеристики холостого хода.

В случае  $r_3 = r_{kp}$  вольт-амперная характеристика выходного каскада совпадает с прямолинейной частью характеристики холостого хода; этому соответствует астатический режим работы ЭМУ. При  $r_3 > r_{kp}$  усилитель будет работать в статическом режиме. В процессе нагрева, при пе-



переходе из астатического в статический режим работы, ток  $I_3$  будет уменьшаться пропорционально увеличению сопротивлений  $r_3$  и  $r_H$ .

2) при прямолинейной коммутации температурное изменение сопротивлений цепей  $r_{13}$  и  $r_{24}$  ведет к расстройке работы промежуточных каскадов усилителя. В результате нагрева ток  $I_3$  уменьшается с увеличением произведения  $r_{13} \cdot r_{24}$ .

3) коэффициент усиления усилителя по мощности  $k_p = \frac{I_3^2 \cdot r_H}{P_y}$  уменьшается в квадратичной зависимости от уменьшения тока нагрузки.

### 3. ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС ЭМУ ПРОЦЕСС ЭМУ ПРИ НЕИЗМЕННОЙ ВЕЛИЧИНЕ М. Д. С. УПРАВЛЕНИЯ, ПРИ КОММУТАЦИИ, ОТЛИЧАЮЩЕЙСЯ ОТ ПРЯМОЛИНЕЙНОЙ

В реальных условиях обеспечение прямолинейной коммутации всех каскадов ЭМУ представляется трудно осуществимой задачей. Практически коммутация ЭМУ всегда отличается от прямолинейной.

При замедленной коммутации происходит ослабление потока главных полюсов размагничивающим продольным потоком добавочных коммутационных токов короткозамкнутых секций якоря. Соответственно при ускоренной коммутации происходит усиление потока главных полюсов ЭМУ.

Для выявления зависимости тока нагрузки  $I_3$  трехступенчатого ЭМУ продольного поля от температурного изменения его параметров при неизменной м. д. с. управления и коммутации, отличающейся от прямолинейной, составим следующую систему исходных уравнений:

$$E_{13} = \frac{c}{a'} \left[ 2 \omega_y I_y + 2 (\omega_k - \omega_a) I_{24} \mp 2 \omega_{k1} \cdot I_{13} \right] \quad (14)$$

$$E_{24} = \frac{c}{a'} (2 \omega_a I_{13} \mp 2 \omega_{k2} I_{24}) \quad (15)$$

$$E_3 = \frac{c}{a'} (2 \omega_b I_{24} + 2 \omega_{cb} I_3 \mp 2 \omega_{k3} I_3) \quad (16)$$

$$\begin{aligned}
 AW_{k1} &= \mp 2 \omega_{k1} I_{13}; & AW_{k2} &= \mp 2 \omega_{k2} I_{24}; \\
 AW_{k3} &= \mp 2 \omega_{k3} I_3
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

Здесь введены дополнительно следующие обозначения:  
 $AW_{k1}$ ,  $AW_{k2}$ ,  $AW_{k3}$  — продольные ампервитки коммутационных токов 1, 2 и 3 ступени усилителя.

$\omega_{k1}$ ,  $\omega_{k2}$ ,  $\omega_{k3}$  — эквивалентное количество витков реакции коммутационных токов.

Верхние знаки соответствуют замедленной коммутации, нижние — ускоренной.

В рассматриваемом случае учет реакции коммутационных токов первой и второй ступени обязателен, так как магнитный поток коммутационных токов соизмерим с основным магнитным потоком этих каскадов.

Реакцией коммутационных токов выходной ступени, при наличии дополнительных полюсов, можно пренебречь, т. к.

$$2 \omega_{k3} I_3 \ll 2 \omega_b I_{24} + 2 \omega_{cb} I_3.$$

Учитывая последнее обстоятельство, уравнение (16) можно упростить, придав ему вид:

$$E_3 = \frac{c}{a'} (2 \omega_b I_{24} + 2 \omega_{cb} I_3) \tag{16'}$$

Решение системы уравнений (14) . . . (17) дает следующую зависимость тока  $I_3$  от параметров усилителя при  $AW_y = const$ .

$$I_3 = \frac{\left(2 \frac{c}{a'}\right)^3 \omega_a \omega_b}{\left(r_3 - 2 \frac{c}{a'} \omega_{cb}\right) \left[\left(r_{13} \pm 2 \frac{c}{a'} \omega_{k1}\right) \left(r_{24} \pm 2 \frac{c}{a'} \omega_{k2}\right) - \left(2 \frac{c}{a'} \omega_a\right)^2 \cdot \varepsilon\right]} AW_y. \tag{18}$$

В выражении (18) верхние знаки соответствуют замедленной, нижние — ускоренной коммутации.

При коммутации, отличающейся от прямолинейной, температурное изменение сопротивления переходного щеточного контакта также существенно не влияет на изменение суммарного сопротивления  $r_{13}$ ,  $r_{24}$  и  $r_3$ .

Нелинейный характер изменения сопротивления  $r_{щ}$  оказывает существенное влияние на изменение сопротивления коммутируемой секции в процессе изменения тем-



пературы. Сопротивление коммутируемой секции состоит из следующих составляющих:

- а) сопротивление проводников секции;
- б) сопротивление соединительных проводов между секцией и коллектором;
- в) переходное сопротивление щеточного контакта.

Сопротивление секции и соединительных проводов  $r_n$  изменяется в соответствии с закономерностями (11) и (12).

Характер изменения переходного сопротивления щеточного контакта в зависимости от температуры для постоянных значений плотности тока  $j = \text{const.}$  был определен экспериментально на усилителе мощностью 0,6 квт, рассчитанном и построенном по программе данной работы в ТПИ.

Путем проведения ряда повторных опытов получены кривые, характеризующие зависимость  $2r_{щ} = f(\tau)$ , при  $j = \text{const.}$  Повторно снятые кривые имеют некоторое расхождение, что свидетельствует о влиянии факторов, не учтенных в опыте (например влажность воздуха). В графическом изображении зависимости  $2r_{щ} = f(\tau)$  могут быть представлены для каждого значения  $j = \text{const.}$  определенными зонами. На основании экспериментальных данных можно сделать вывод, что сопротивление переходного щеточного контакта усилителя в пределах возрастания температуры коллектора от 40°C до 70°C уменьшается по кривой, близкой к гиперболической.

Температурное изменение полного сопротивления определяется графоаналитически (рис. 3), аналогично способу, представленному на рис. 2. Кривые на рис. 3 построены по параметрам опытного образца усилителя (мощностью 0,6 квт).

Полное сопротивление  $r_c$  коммутируемой секции вначале уменьшается вследствие гиперболического уменьшения сопротивления переходного щеточного контакта с возрастанием температуры. Затем  $r_c$  приобретает возрастающий характер, в связи с линейно увеличивающимся значением сопротивления проводников секции. Это увеличение особенно заметно в случае, если обмотка якоря имеет относительно большое число витков в секции, как, например, в опытном образце усилителя мощностью





Значение добавочного коммутационного тока  $i_k$  определяется добавочной э. д. с. в короткозамкнутой секции  $e_a = e_r - e_k$  и полным сопротивлением коммутируемой секции  $r_c$ :

$$i_k = \frac{e_a}{r_c} = \frac{e_r - e_k}{r_c} \quad (20)$$

Здесь  $e_r$  — реактивная э. д. с.

$e_k$  — коммутирующая э. д. с.

Из сравнений выражений (17), (19) и (20) нетрудно увидеть, что входящие в знаменатель (18) слагаемые  $2 \frac{c}{a'} \omega_{k1}$  и  $2 \frac{c}{a'} \omega_{k2}$  изменяются при изменении температурного состояния усилителя пропорционально изменению добавочных коммутационных токов  $i_{k1}$  и  $i_{k2}$ .

Из вышеизложенного следует, что при коммутации, отличающейся от прямолинейной, увеличение сопротивлений  $r_3$ ,  $r_{13}$  и  $r_{24}$  в ходе нагрева не является решающим фактором, влияющим на настройку усилителя, так как слагаемые  $2 \frac{c}{a'} \omega_{k1}$  и  $2 \frac{c}{a'} \omega_{k2}$  могут быть по величине соизмеримыми соответственно с  $r_{13}$  и  $r_{24}$ .

При коммутации, отличающейся от прямолинейной, возможны следующие случаи температурного переходного процесса усилителя.

1) Коммутация промежуточных ступеней усилителя замедлена. В процессе нагрева увеличиваются сопротивления  $r_3$ ,  $r_{13}$  и  $r_{24}$ , а также происходит нелинейное увеличение размагничивающего потока реакции коммутационных токов. Следовательно при замедленной коммутации, согласно выражению (18) происходит уменьшение тока нагрузки  $I_3$ . С учетом уменьшения сопротивления  $r_c$  в начальной части температурного переходного процесса (рис. 3) происходит интенсивное размагничивание усилителя и уменьшение тока  $I_3$ .

2) Коммутация промежуточных ступеней усилителя ускорена. В этом случае знаменатель выражения (18) приобретает вид:

$$\Sigma r = (r_3 - 2 \frac{c}{a'} \omega_{cb}) \left[ (r_{13} - 2 \frac{c}{a'} \omega_{k1}) (r_{24} - 2 \frac{c}{a'} \omega_{k2}) - \right. \\ \left. - (2 \frac{c}{a'} \omega_a)^2 \cdot \varepsilon \right]. \quad (21)$$

Ускорение коммутации одновременно в первой и второй ступени приводит в процессе нагрева сравнительно просто к неустойчивости работы усилителя. Самовозбуждение произойдет тем скорее, чем точнее усилитель компенсирован, т. е. чем точнее выполнено условие  $\varepsilon \approx 0$ .

3) Коммутация одной промежуточной ступени замедлена, другой — ускорена.

Анализ схемы усилителя (рис. 1) и выражений (14) — (17) показывает, что с точки зрения температурной устойчивости наиболее эффективным оказывается влияние ускоренной коммутации второй ступени ЭМУ. В этом случае знаменатель выражения (18) получает вид:

$$\Sigma r = (r_3 - 2 \frac{c}{a'} \omega_{cb}) \left[ r_{13} + 2 \frac{c}{a'} \omega_{k1} \right] (r_{24} - 2 \frac{c}{a'} \omega_{k2}) - (2 \frac{c}{a'} \omega_a)^2 \cdot \varepsilon. \quad (22)$$

В таком случае подбором степени ускорения коммутации можно достичь постоянства выражения (22):  $\Sigma r = const.$ , минимально при двух различных температурных состояниях усилителя, так как  $2 \frac{c}{a'} \omega_{k2} > 2 \frac{c}{a'} \omega_{k1}$  и слабое  $2 \frac{c}{a'} \omega_{k2}$  увеличивается с нагревом по нелинейной кривой. Следовательно при ускоренной коммутации во второй ступени возможно достичь постоянства тока  $I_3$ , также минимально при двух различных температурных состояниях усилителя.

В случае, если якорь ЭМУ имеет большое количество витков в секции (порядка 8, как в экспериментальном ЭМУ 0,6 квт), требуется соответствующее увеличение витков добавочных полюсов. Однако усиление добавочных полюсов сказывается различным образом на работу первой и второй ступени.

Увеличение м. д. с. добавочных полюсов первого каскада приводит к увеличению коммутирующего поля в зоне коммутации. Но м. д. с. усиленных добавочных полюсов оказывается достаточной и для создания составляющей магнитного потока, действующей по оси главных полюсов II—IV навстречу поперечной реакции якоря от тока  $I_{13}$  и размагничивающей, таким образом, второй каскад усилителя. Намагничивающий эффект вследствие ускорения коммутации в первой ступени теряет свое значение.



Эффективность от ускорения коммутации 2-й ступени имеет явно выраженный характер. Добавочными полюсами 2-го каскада создается намагничивающая м. д. с. добавочных коммутационных токов этой ступени, а, кроме того, этими добавочными полюсами создается продольное намагничивающее поле, действующее согласно с потоком обмотки управления.

Учет действия потока добавочных полюсов по оси главных полюсов различными авторами в их опубликованных трудах до сих пор не производился. Для выявления зависимости э. д. с.  $E''_{13}$  от м. д. с. добавочных полюсов 2-й ступени были сняты опытные кривые холостого хода 1-й ступени двумя способами:

а) путем создания магнитного потока по оси главных полюсов I—III с помощью обмотки управления, расположенной на этих полюсах, и замера э. д. с.  $E'_{13}$ ;

б) путем питания обмотки добавочных полюсов 2-й ступени от постороннего источника и замера э. д. с.  $E''_{13}$  при холостом ходе 1-й ступени.

На рис. 4 представлены для сравнения кривые  $E'_{13} = f(AW)_y$  и  $E''_{13} = f(AW)_{d24}$ .

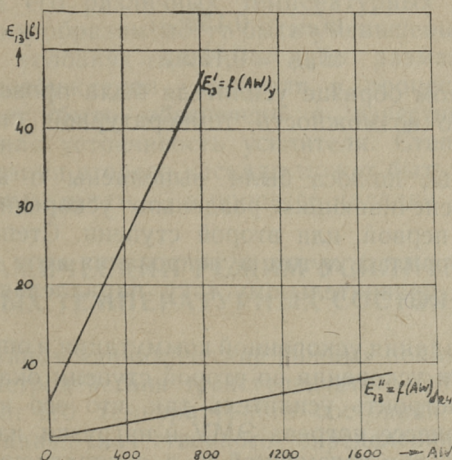


Рис. 4.



При нормальных зазорах под добавочными полюсами составляющая э. д. с.  $E''_{13}$ , индуцируемая потоком добавочных полюсов на щетках 1—3, выражается в пределах 15% от э. д. с.  $E'_{13}$ .

Таким образом добавочные полюса второй ступени принимают на себя дополнительно роль компенсационной обмотки.

С учетом вышесказанного действия потока добавочных полюсов по оси главных полюсов в уравнение (14) добавляется слагаемое  $+ 2 \omega'_{d24} I_{24}$ , а в уравнение (15) добавляется  $- 2 \omega'_{d13} I_{13}$ .

Теперь решение системы уравнений (14)—(17) дает следующую зависимость тока  $I_3$  от параметров усилителя при  $AW_y = \text{const}$ :

$$I_3 = \frac{\left(2 \frac{c}{a'}\right)^3 (\omega_a - \omega'_{d13}) \omega_b}{\left(r_3 - 2 \frac{c}{a'} \omega_{cb}\right) \left[\left(r_{13} + \frac{c}{a'} \omega_{k1}\right) \left(r_{24} - 2 \frac{c}{a'} \omega_{k2}\right) - \left(2 \frac{c}{a'} \omega_a\right)^2\right] \cdot \varepsilon'}{AW_y} \quad (23)$$

Здесь  $\varepsilon = \frac{2\omega'_k - 2\omega_a}{2\omega_a}$  — степень недокомпенсации продольной реакции якоря, с учетом действия добавочных полюсов.

$$2\omega'_k = 2\omega_k + 2\omega'_{d24}.$$

$$\omega'_{d24} \approx 0,15\omega_{d24}.$$

$$\omega'_{d13} \approx 0,15\omega_{d13}.$$

На опытном образце усилителя была проверена экспериментально возможность температурной стабилизации ЭМУ.

Добавочные полюса были выполнены с количеством витков, обеспечивающим отдельно ускоренную коммутацию или первой, или второй ступени. Степень ускорения регулировалась путем шунтирования цепи добавочных полюсов по уравнительному току параллельным сопротивлением.

Путем создания ускоренной коммутации и опытного подбора степени ускорения во второй ступени оказалось возможным настроить усилитель так, что его нагрузочный ток  $I_3$  в процессе нагрева ЭМУ и нагрузки изменился не более  $\pm 10\%$  при неизменной м. д. с. управления (таблица № 2 и рис. 5).



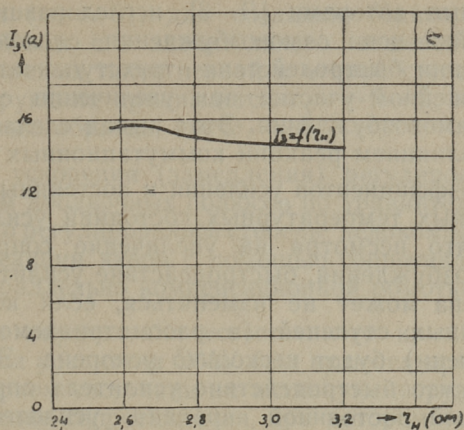


Рис. 5.

Эксперименты, проведенные аналогичным образом в первой ступени усилителя, показали, что ускорение коммутации первой ступени не обеспечивает постоянства тока  $I_3$  в процессе нагрева усилителя и нагрузки.

Из вышеизложенного следует, что наладку коммутации трехступенчатого ЭМУ продольного поля следует производить при его различных температурных состояниях. Только таким образом могут быть уменьшены в эксплуатационных условиях явления либо размагничивания, либо самовозбуждения усилителя в процессе нагрева, т. е. может быть обеспечена в известной степени температурная устойчивость усилителя. Степень ускорения коммутации второго каскада может быть определена лишь опытным путем — в процессе наладки.

#### 4. ДИНАМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ УСИЛИТЕЛЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ СОСТОЯНИЯХ ЭМУ

Под термином «динамический режим» понимается зависимость быстродействия трехступенчатого ЭМУ продольного поля от его температурного состояния. Была рассмотрена задача качественного определения динамического режима; методика расчета переходного процесса усилителя в данной работе не определяется.

Некоторыми авторами [Л. 3], исследовавшими влияющие настройки цепи самовозбуждения, сделаны выводы об уменьшении быстродействия трехступенчатого ЭМУ на прямолинейном участке при увеличении сопротивления цепи самовозбуждения. Этот вывод сделан в пренебрежении влиянием реакции коммутационных токов.

Расчет коэффициентов усиления и постоянных времени для различных температурных состояний усилителя показывает, что несмотря на увеличение сопротивления цепи самовозбуждения, быстродействие усилителя в процессе нагрева может не изменяться, если коммутация промежуточных ступеней (в рассматриваемом случае второй ступени) будет несколько ускорена. Это объясняется тем, что быстродействие усилителя определяется эквивалентной постоянной времени усилителя  $T_{эkv}$  и мощностью управления.

При нагреве эквивалентная постоянная времени  $T_{эkv}$  уменьшается и вместе с тем ускорение коммутации эквивалентно увеличению мощности управления.

## 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА ТРЕХСТУПЕНЧАТОГО ЭМУ ПРОДОЛЬНОГО ПОЛЯ

Для экспериментального исследования влияния нелинейных элементов в цепях ЭМУ на температурный переходный процесс был рассчитан и построен на базе нормальной машины постоянного тока опытный образец трехступенчатого ЭМУ продольного поля с последовательной обмоткой самовозбуждения.

### А. Расчетные данные.

Мощность на выходе . . . . .	$P_3 = 0,6$ квт.
Напряжение номинальное . . . . .	$U_3 = 45$ в.
Ток нагрузки . . . . .	$I_3 = 14$ а.
Критическое сопротивление нагрузки	$r_{кр} = 3,2$ ом.
Скорость вращения . . . . .	$n = 1000$ об/мин.

Б. В отличие от обычных конструкций опытный ЭМУ был рассчитан и выполнен с большим числом витков в сек-



ции якоря ( $\omega_c = 8$ ), для создания большего значения реактивной э. д. с. и значительного изменения реакции коммутационных токов первой и второй ступени. В обычных конструкциях принимается  $\omega_c = 2 \div 3$ ; имеется пример опытного образца, где  $\omega_c = 5$ .

Степень ускорения (замедления) регулировалась шунтированием добавочных полюсов по уравнительному току. Аналогично регулировалась степень недокомпенсации продольной реакции якоря с помощью сопротивлений, включенных параллельно компенсационной обмотке.

В. Для определения естественного критического сопротивления усилителя ЭМУ был включен при начальном температурном состоянии на активную нагрузку. Определено значение сопротивления, при котором усилитель работает в астатическом режиме:  $r_n = r_{kp} = 2,56$  ом. Соответственно этой настройке была снята нагрузочная характеристика  $U'_3 = f'(i_y)$ , представленная на рис. 6.

Далее, при этом же температурном состоянии усилителя была снята нагрузочная характеристика для  $r_n = 1,25 r_{kp} = 3,2$  ом, что соответствует нагретому состоянию нагрузки. Кривая  $U''_3 = f''(i_y)$  приведена на рис. 6.

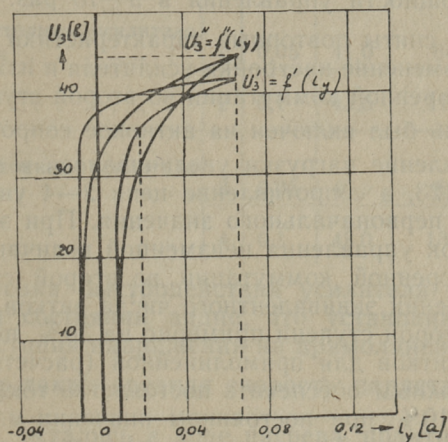


Рис. 6.

Результаты, характеризующие ток  $I_3$ , напряжение на выходе  $U_3$ , мощность на выходе  $P_3$ , мощность управления  $P_y$  и коэффициент усиления по мощности  $K_p = \frac{P_3}{P_y}$ , сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Режим	$I_3$ (а)	$U_3$ (в)	$P_3$ (квт)	$i_y$ (вт)	$P_y$ (вт)	$K_p$
$r_n = r_{кр} = 2,56$ ом	14,0	36,0	0,51	0,020	0,04	12 700
$r_n = 1,25r_{кр} = 3,2$ ом	14,0	45,0	0,63	0,066	0,43	1 460

Анализ данных, приведенных в таблице 1, подтверждает, что в установившемся температурном состоянии и при неизменной коммутации увеличение сопротивления цепи самовозбуждения приводит к резкому уменьшению коэффициента усиления.

В случае, если увеличение сопротивления цепи самовозбуждения произошло в результате температурного изменения состояния усилителя и нагрузки, т. е. в результате нагрева, также происходит резкое уменьшение коэффициента усиления. Следовательно, для поддержания неизменного значения тока нагрузки  $I_3$ , потребуется увеличение м. д. с. управления в 3—3,5 раза, чему соответствует увеличение мощности управления в 9—10 раз.

Г. Были сняты повторные характеристики влияния нагрева на изменение настройки усилителя и изменение тока  $I_3$ , при ускоренной коммутации во второй ступени.

Усилитель был включен на активное сопротивление.

Сопротивление нагрузки увеличивалось в процессе нагрева до 1,23, а сопротивление цепи 2—4 увеличивалось до 1,30 от первоначального значения. При этом поддерживался ток управления неизменной величины.

При ускоренной коммутации во второй ступени, т. е. при увеличении эквивалентного числа витков добавочных полюсов второй ступени примерно на 30%, по сравнению с числом витков для прямолинейной (расчетной), оказалось возможным обеспечить постоянство тока  $I_3$  с точностью до  $\pm 10\%$ , при постоянном значении м. д. с. управления и неизменной степени недокомпенсации продольной реакции якоря.



Результаты, полученные для нижней ветви петли гистерезиса, сведены в таблицу 2 и представлены на рис. 5.

Таблица 2

$i_y$ (а)	$r_{24}$ (ом)	$\frac{r_{24}(\tau^{\circ}\text{C})}{r_{24}(20^{\circ}\text{C})}$	$r_H$ (ом)	$\frac{r_H(\tau^{\circ}\text{C})}{r_H(20^{\circ}\text{C})}$	$I_3$ (а)	$U_3$ (в)
0,05	0,86	1,0	2,56	1,0	15,4	39,5
0,05	0,96	1,11	2,6	1,02	15,8	41,0
0,05	1,03	1,20	2,8	1,09	15,0	42,0
0,05	1,12	1,30	3,2	1,23	14,5	45,5

Д. Были сняты осциллограммы скорости нарастания напряжения при двух значениях сигналов  $i_y = 0,05\text{а}$  и  $i_y = 0,1\text{а}$ , для холодного ( $\tau = 20^{\circ}\text{C}$ ) и нагретого ( $\tau = 70^{\circ}\text{C}$ ) состояния усилителя и нагрузки в режиме критического самовозбуждения.

Основные показатели по результатам обработки осциллограмм даны в таблице 3.

Таблица 3

Режим	Осц. №	$i_y$ (а)	$U_3$ (в)	$\frac{dU_3}{dt}$ (в/сек)	$\frac{dU_3}{dt} (max)$ (в/сек)
Холодное состояние усилителя и нагрузки . . . . .	1	0,05	41,0	64	147
	2	0,1	43,5	114	240
Нагретое состояние усилителя и нагрузки . . . . .	3	0,05	45,5	69	150
	4	0,1	48,0	133	266

Из сравнения быстродействия усилителя в холодном и нагретом состоянии видно, что установившаяся скорость нарастания напряжения на прямолинейном участке  $\frac{dU_3}{dt} (max)$ , а также средняя скорость нарастания напряжения  $\frac{dU_3}{dt}$  остались в ходе нагрева практически неизменными.

Полученные результаты хорошо согласуются с известными выводами, говорящими о том, что быстроедействие усилителя при его работе в режиме критического самовозбуждения на различные сопротивления нагрузки остается при равных сигналах неизменным.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Нелинейные элементы в цепях трехступенчатого ЭМУ продольного поля оказывают на работу усилителя существенное влияние.

Усилитель с последовательной обмоткой самовозбуждения чувствителен к температурным изменениям сопротивлений цепей промежуточных каскадов и цепи самовозбуждения; основное значение имеет температурное изменение переходного сопротивления щеточного контакта первого и второго каскада, с чем связано изменение условий коммутации.

2. Нелинейное уменьшение переходного сопротивления щеточного контакта может быть использовано для компенсации температурного увеличения сопротивления проводников коммутируемой секции. Для этого целесообразно создать ускоренную коммутацию второй ступени. Тем самым оказывается возможным уменьшить расстройку режима усилителя при нагреве.

3. Действие потока добавочных полюсов по оси главных полюсов, а также действие коммутационных токов целесообразно учитывать в виде внутренних обратных связей усилителя.

Основными внутренними обратными связями трехступенчатого ЭМУ являются:

а) жесткая отрицательная обратная связь с выхода второй ступени на вход первой ступени (связь недокомпенсации продольной реакции якоря, с учетом компенсирующего действия добавочных полюсов);

б) гибкая обратная связь с выхода первой на вход первой ступени (связь коммутационная первой ступени);

в) гибкая обратная связь с выхода второй на вход второй ступени (связь коммутационная второй ступени).



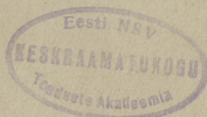
4. Учет перечисленных обратных связей имеет существенное значение для улучшения характеристик трехступенчатого ЭМУ продольного поля.

Однако использование внутренних обратных связей не является окончательным решением проблемы температурной стабилизации усилителя, так как оно связано с влиянием факторов, аналитический учет которых возможен лишь приближенно. Использование внутренних обратных связей с целью температурной стабилизации усилителя возможно путем тщательной опытной наладки их.

5. Для дальнейших разработок данной проблемы предлагается ввести внешние обратные связи с выхода усилителя на вход либо первой, либо второй ступени (обмотка ОС — рис. 1), с использованием нелинейных элементов во внешних обратных связях, с целью исследования возможности температурной стабилизации усилителя в широком диапазоне температур.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ермолин Н. П. Переходные процессы в машинах постоянного тока. 1951.
2. Карасев М. Ф. Коммутация машин постоянного тока. 1955.
3. Малишевский В. Е. Исследование установившихся и переходных режимов работы трехступенчатого электромашинного усилителя продольного поля. Автореферат канд. диссертации. 1956.
4. Норневский Б. И., Байко В. Ф., Малишевский В. Е., Куропаткин П. В., Рясин Е. И. Сравнение двух- и трехступенчатых электромашинных усилителей с продольным полем. «Электричество», № 3, 1958.
5. Самолевский Г. К. Исследование релейного режима трехступенчатого электромашинного усилителя продольного поля. Труды ТПИ, выпуск № 133, 1958.







Г. К. Самолевский  
НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В ЦЕПЯХ  
ЭЛЕКТРОМАШИННОГО  
УСИЛИТЕЛЯ ПРОДОЛЬНОГО  
ПОЛЯ

Таллинский Политехнический Институт

\*

Редактор Х. Тийсмус  
Технический редактор А. Тамм  
Корректор А. Илмвейер

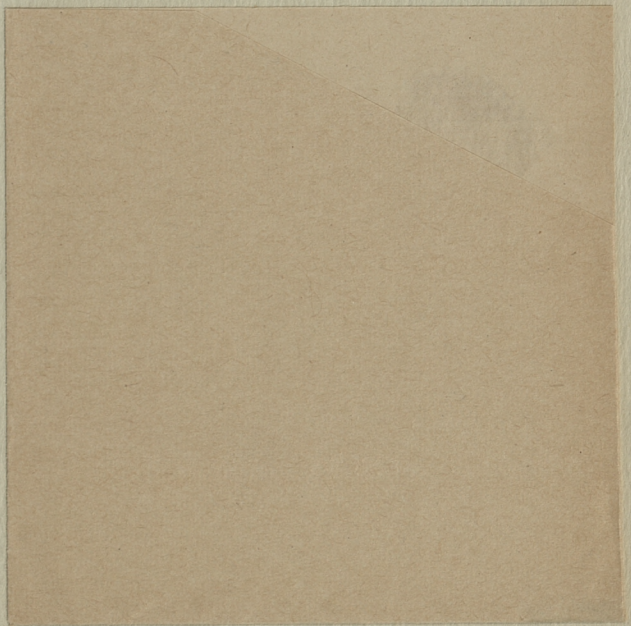
Сдано в набор 5 VII 1960. Подписано к печати 8 X 1960. Бумага  $54 \times 84 \frac{1}{16}$ . Печатных листов 1,75. По формату  $60 \times 92$  печатных листов 1,43. Учетно-издательских листов 1,1.

Тираж 500. МВ-06567. Заказ 2419.  
Типография «Юхисэлу», г. Таллин,  
ул. Пикк, 40/42.

Цена 80 коп.







Цена 80 коп.

с 1. 1. 1961 г.

Цена ..... р. 8 к.